

Литература

Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.

Пат. 2105332 Российская Федерация. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений / Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. № 94042027/25. Заявл. 23.11.94. Оpubл. 20.02.98. Бюл. № 5.

Прогностика. Терминология, вып. 92. М., «Наука», 1978. 32 с.

Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Изучение высокочастотного сейсмического шума по данным режимных наблюдений на Камчатке // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 3. С. 39–47.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 37–50.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124.

Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А. Специализированная станция регистрации сейсмических шумов «Начики» в системе геофизического мониторинга Камчатки // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 24–41.

Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction // PEPI. 1990. V. 61. P. 84–98.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. V. 118. P. 8719–8721.

УДК 556.33:550.348

ТРИГГЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ (ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ)

Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

Рассматривается влияние землетрясений на изменение наблюдаемых в скважинах параметров режима подземных вод с возможностью оценки масштабов и значимости таких изменений при решении широкого круга задач гидрогеологии, геоэкологии и сейсмического прогнозирования. Основу работы составляют материалы специализированных наблюдений на скважинах территории Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка, проводимых Камчатским филиалом Геофизической службы РАН для поиска гидрогеологических предвестников землетрясений.

Введение

Будем понимать под триггерным воздействием на подземные воды изменения их гидродинамических (уровни, дебиты, давление) и физико-химических (температура, химический состав воды) параметров, которые вызываются природными или техногенными факторами (триггерами). Такие изменения являются нехарактерными для общих закономерностей формирования режима подземных вод и проявляются в течение некоторого времени после воздействия триггера. Отсюда вытекает важное методическое следствие о необходимости изучения общих закономерностей режима наблюдательных скважин, источников и других объектов гидрогеологического мониторинга, так как оценка значимости эффекта от воздействия триггера может производиться только по отношению к фоновым изменениям их режима.

Если рассматривать сильное землетрясение как фактор, воздействующий на подземные воды, то можно выделить три его составляющие: 1 – процессы подготовки землетрясения; 2 – образование разрыва в очаге и изменение статического напряженного состояния водовмещающих пород; 3 – динамическая деформация водовмещающих пород и сотрясения ствола скважины при прохождении сейсмических волн. Следует отметить, что процессы подготовки землетрясений слабо изучены экспериментальными геодезическими, геофизическими и гидрогеологическими методами в плейстосейстовых зонах сильных землетрясений и теоретические представления о них основываются на ограниченном и не всегда однозначном материале эпизодических наблюдений различных видов предвестников. Значительно лучше изучены процессы перераспределения статического поля напряжений при образовании разрывов в очагах землетрясений и распространения сейсмических волн.

Воздействие землетрясений проявляется в гидрогеосейсмических вариациях параметров режима скважин и источников, которые являются основным объектом научного интереса при проведении специализированных наблюдений в сейсмоактивных регионах. В соответствии с указанными выше факторами сейсмического воздействия среди всей совокупности гидрогеосейсмических вариаций можно выделить: 1 – гидрогеологические предвестники, которые проявляются перед сильными землетрясениями преимущественно в плейстосейстовых зонах при возникновении асейсмических движений в области очага либо вследствие развития приповерхностной зоны трещинной дилатансии в водовмещающих породах; 2 – косейсмические скачки повышения или понижения уровня воды, амплитуды и направление которых находятся в соответствии с механизмом очага землетрясения и пространственным перераспределением статического поля напряжений в геологической среде (как правило, косейсмические скачки проявляются в скважинах, вскрывающих водоносные горизонты или трещинные зоны с напорными подземными водами); 3 – разнообразные ко- и постсейсмические эффекты вследствие динамического воздействия сейсмических волн на состояние системы скважина – водовмещающая порода и проявляющиеся в форме колебаний, повышений и понижений уровня воды различной продолжительности, в изменениях дебитов, температуры и химического состава подземной воды [Копылова, 2006б].

Сеть скважин и методика наблюдений

Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит наблюдения за режимом подземных вод на скважинах и источниках на территории Петро-

павловского геодинамического полигона с 1977 г. Цель работ – поиск гидрогеологических предвестников землетрясений и разработка методов их прогноза. Такие работы выполняются лабораториями гидросейсмологии и геофизических исследований. В лаборатории гидросейсмологии наблюдения проводятся на самоизливающихся скважинах и источниках на четырех станциях Пиначево, Морозная, Хлебозавод и Верхняя Паратунка (всего 7 скважин и четыре источника), расположенных в областях разгрузки термоминеральных подземных вод различных гидрогеохимических типов. Станции посещаются сотрудниками один раз в 3–6 дней. При этом производится отбор проб воды и растворенного газа, замеры дебита и температуры воды. Затем пробы анализируются в химической лаборатории и формируются временные ряды концентраций минеральных и газовых компонентов состава воды. В результате проведения таких многолетних наблюдений были обнаружены и описаны проявления гидрогеологических предвестников в изменениях химического состава воды и газа в связи с рядом землетрясений с магнитудами M порядка 7 и более, произошедших на расстояниях не более 200 км от наблюдательных пунктов, а также постсейсмические изменения дебитов, температуры и химического состава вод и газа [Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004].

Лаборатория геофизических исследований проводит регистрацию уровня, температуры и электропроводности воды в двух скважинах Е-1 (глубина 665 м, в интервале 625–647 м выполнена перфорация обсадной колонны, уровень на глубине 27 м ниже оголовка) и ЮЗ-5 (глубина 800 м, в диапазоне глубин 310–800 м обсадка отсутствует, уровень на глубине 1 м). Данные о строении скважин и локальных гидрогеологических условиях приводятся в [Копылова, 2001, 2006], а также на сайте КФ ГС РАН по адресам <http://emsd.ru/lgi/places/e1> и <http://emsd.ru/lgi/places/uz5>.

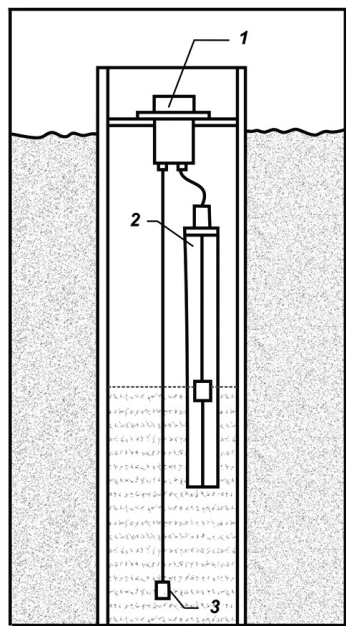


Рис. 1. Схема установки измерительного комплекса Кедр-ДМ-У и его компонентов в скважине.

1 – БСИ 300 – блок сбора информации, включающий датчики атмосферного давления и температуры воздуха; 2 – ультразвуковой датчик уровня воды; 3 – глубинный зонд, оборудованный датчиками температуры и электропроводности воды

В обеих скважинах наблюдения проводятся с использованием аппаратного комплекса Кедр-ДМ-У (ООО Полином, г. Хабаровск, [Калинов и др., 2012]) с телеметрической передачей данных в КФ ГС РАН по каналам сотовой связи. В состав Кедр-ДМ-У входят высокочувствительный ультразвуковой датчик уровня воды, позволяющий регистрировать изменения уровня с точностью $\pm 0,1$ мм, и глубинный зонд для измерений электропроводности и температуры подземной воды. В скв. ЮЗ-5 зонд находится на глубине 97 м ниже оголовка, в скв. Е-1 – на глубине 20 м. Датчики атмосферного давления и температуры воздуха входят в состав блока регистрации БСИ 300, который устанавливается над оголовком скважины. Схема установки измерительного комплекса на скважинах приводится на рис. 1. Измерения гидрогеологических и метеорологических параметров проводятся с интервалом 5 минут. Передача данных в КФ ГС РАН осуществляется один раз в час, обработка данных проводится ежедневно. Результаты обработки в

виде графиков временных рядов изменений уровня воды (исходных и очищенных от влияния приливных и баровариаций) представляются на сайте КФ ГС РАН по адресу <http://emsd.ru/lgi/observations>.

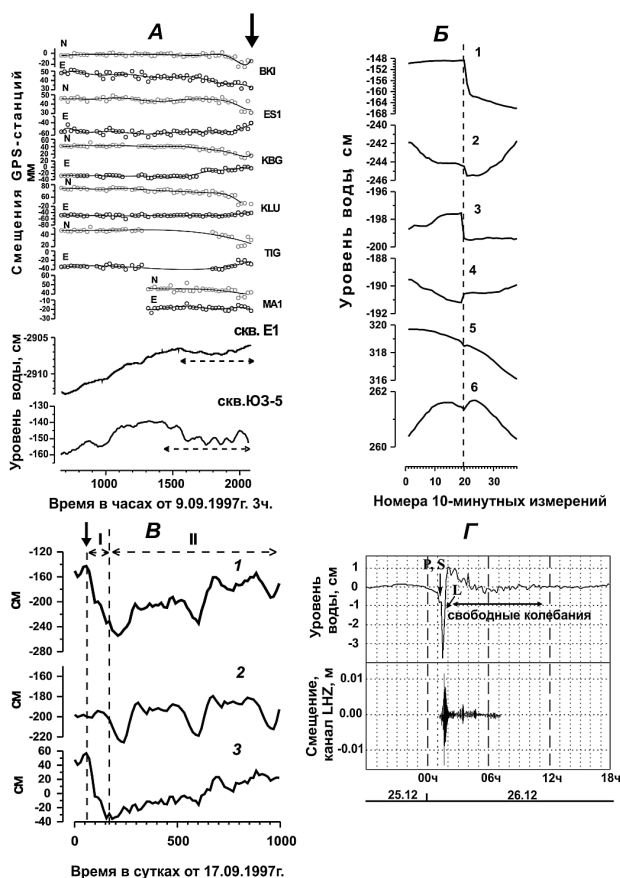
Методики обработки данных уровнемерных наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций, включая гидрогеодинамические предвестники землетрясений, приводятся в [Копылова и др., 2007] и в других публикациях авторов (см. <http://emsd.ru/lgi/result/hydro>). С ее использованием гидрогеосейсмические вариации в изменениях уровня, температуры и электропроводности воды могут выделяться в режиме близком к реальному времени с задержкой между измерением параметров и отображением временных рядов обработанных уровнемерных данных на мониторе оператора не более одних суток.

С использованием представленной системы наблюдений получены многочисленные данные по изменениям параметров подземных вод при ощутимых землетрясениях 1977–2013 гг. с интенсивностью сотрясений от 3 до 5–6 баллов по шкале MSK-64.

Гидрогеосейсмические вариации

Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г., $M = 7,8$. При Кроноцком землетрясении (КЗ) впервые были зарегистрированы изменения уровня в скв. ЮЗ-5, со-

Рис. 2. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скв. ЮЗ-5 в связи с Кроноцким землетрясением (КЗ). *А* – гидрогеодинамический предвестник (показан пунктирной линией) приводится в сопоставлении с вариациями уровня воды в скв. Е-1 и перемещениями GPS-станций локальной сети KAMNET. *Б* – косейсмические скачки уровня воды. *В* – понижение уровня воды после КЗ в течение 3,5 мес. (I) и его последующее восстановление в течение двух лет (II); 1 – данные наблюдений, 2 – выделенные годовая сезонность и линейный тренд, 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда. *Г* – колебания уровня воды в результате Суматранского землетрясения 26.12.2004 г., $M = 9$, гипоцентрального расстояния $R = 8250$ км; приводятся в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, с/ст. Петропавловск [Копылова, 2006а]



ответствующие всем трем указанным выше факторам сейсмического воздействия (рис. 2). Гидрогеодинамический предвестник проявился в синхронных понижениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 с амплитудами 11 и 1 см в течение трех недель (рис. 2, А). По времени он соответствовал аномальным перемещениям некоторых GPS станций локальной сети и, по-видимому, был вызван квазиупругой деформацией водовмещающих пород при активизации преимущественно асейсмических движений в области будущего очага. В момент КЗ был зарегистрирован ко-сейсмический скачок понижения уровня с амплитудой 12 см в течение времени не более 10–13 минут (рис. 2, Б). Наблюдались также длительные постсейсмические изменения уровня воды вследствие воздействия сейсмических волн – понижение уровня с амплитудой около 1 м в течение трех месяцев и последующее двухлетнее восстановление (рис. 2, В).

Гидрогеосейсмические вариации, зарегистрированные в связи с сильными землетрясениями 2013 г. В 2013 г. на Камчатке произошла серия сильных землетрясений с магнитудами 6 и более (рис. 3). В акватории Тихого океана произошли три роя коровых землетрясений с максимальными магнитудами от 6,1 до 6,8. 24 мая в Охотском море произошло мантийное землетрясение с магнитудой 8,3. В результате этих землетрясений были зарегистрированы разнообразные изменения уровня и физико-химических параметров подземных вод в режиме близком к реальному времени.

На рис. 4 показаны изменения уровня, температуры и электропроводности воды в скв. ЮЗ-5 при двух наиболее сильных землетрясениях 2013 г. 28 февраля, $M = 6,8$ и 24 мая, $M = 8,3$ (рис. 3). После вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля в течение 45 минут происходило повышение уровня с амплитудой 2,2 см (рис. 4, Б) и 24 мая наблюдалось повышение уровня в течение 20 минут с амплитудой 7,3 см (рис. 4, В). Такие эффекты могли быть вызваны наложением ко-сейсмических скачков повышения давления подземной воды вследствие объемного

сжатия водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений и импульсного повышения порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении сейсмических волн [Болдина, Копылова, 2013].

После землетрясения 28 февраля в среднечасовых изменениях уровня воды проявилось его интенсивное понижение (рис. 4, А), которое развивалось до середины апреля. Амплитуда понижения уровня в течение 1,5 месяцев составила 35 см. Следует отметить, что эффект постсейсмического понижения уровня воды наблюдался ранее в скв. ЮЗ-5 лишь однажды, после Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w = 7,8$ (рис. 2, В). В случае КЗ понижение уровня с ам-

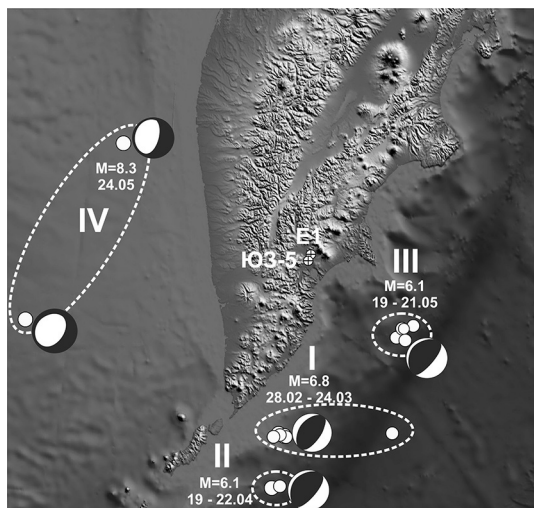


Рис. 3. Схема эпицентров сильных землетрясений 2013 г. с указанием величин максимальных магнитуд в выделенных четырех группах сейсмических событий (I-IV)

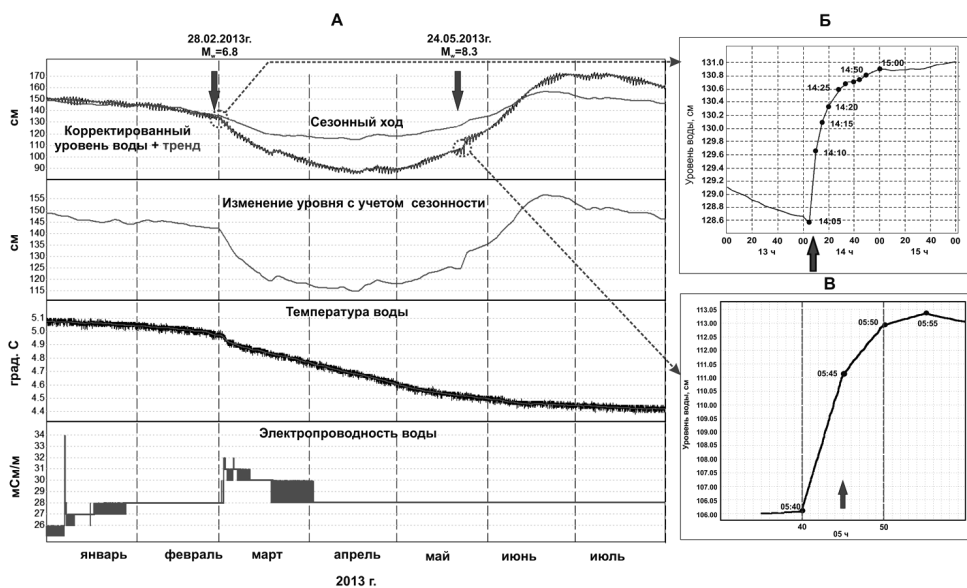


Рис. 4. Изменения уровня, температуры и электропроводности воды в скважине ЮЗ-5 с 1 января по 1 августа 2013 г., включающие ко- и постсейсмические вариации вследствие землетрясений 28 февраля и 24 мая 2013 г. (показаны стрелками)

плитудой около 1 м продолжалось три месяца [Копылова, 2006а]. После землетрясения 24 мая проявилось интенсивное повышение уровня воды (рис. 4, А), которое развивалось до конца июня. Амплитуда повышения уровня составила 24 см.

В среднечасовых изменениях уровня воды, очищенных от влияния атмосферного давления, земных приливов и сезонных вариаций (рис. 4, А), не обнаружены аномалии в диапазоне периодов суток – десятки суток перед обоими землетрясениями. Это указывает на отсутствие значимых проявлений процессов подготовки этих сейсмических событий в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 в течение суток – первых месяцев перед землетрясениями 28 февраля и 24 мая 2013 г.

На рис. 4, А представлены изменения температуры и электропроводности воды в скв. ЮЗ-5. После землетрясения 28 февраля 2013 г. произошло заметное понижение температуры воды и повышение электропроводности, которые можно отнести к постсейсмическим вариациям в режиме подземных вод. Резкое повышение электропроводности воды с амплитудой 6 мСм/м было зарегистрировано 7 января, то есть примерно за 8 недель до землетрясения. Возможное значение этого эффекта для прогноза землетрясений можно будет оценить по результатам дальнейших наблюдений.

Гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью, проявляющийся в скв. Е-1, ранее был описан в [Копылова, 2001, 2008; Копылова, Сизова, 2012]. Важными особенностями этого вида предвестника являются:

- относительно регулярная повторяемость предвестника перед землетрясениями с величинами магнитуд $M \geq 5,0$ на расстояниях до 350 км (более 70% случаев), что позволяет использовать его для прогнозирования сильных местных землетрясений;

– увеличение связи предвестника и землетрясений с ростом величины их магнитуды [Копылова, Сизова, 2012], указывающее на то, что перед более сильными сейсмическими событиями предвестник в изменениях уровня воды в скв. Е-1 проявляется с большей регулярностью. С использованием этого вида предвестника по текущим данным уровневых наблюдений на скв. Е-1 осуществляется оценка опасности возникновения сильных землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского с предоставлением прогнозных заключений в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС).

Изменения уровня воды в скв. Е-1 в период землетрясения 28 февраля: понижение с повышенной скоростью в течение 44 сут перед землетрясением и его повышение с амплитудой около 2 см после землетрясения (рис. 5), является типичным для периодов возникновения сильных ($M \geq 6,6$) местных землетрясений на расстояниях до 300 км [Копылова, 2001]. В соответствии с установленной ранее закономерностью в скв. Е-1 было зарегистрировано последовательное проявление гидрогеодинамического предвестника и постсейсмическое повышение в изменениях уровня воды.

В прогнозном заключении от 1 февраля 2013 г., поданном в КФ РЭС, указывалось, что «в течение времени 1-2 месяца повышена вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 5,0$ на расстоянии до 350 км от скважины». В заключении также были приведены оценки надежности прогноза для землетрясений с различными величинами магнитуды, основывающиеся на результатах ретроспективного анализа проявлений гидрогеодинамического предвестника за период многолетних наблю-

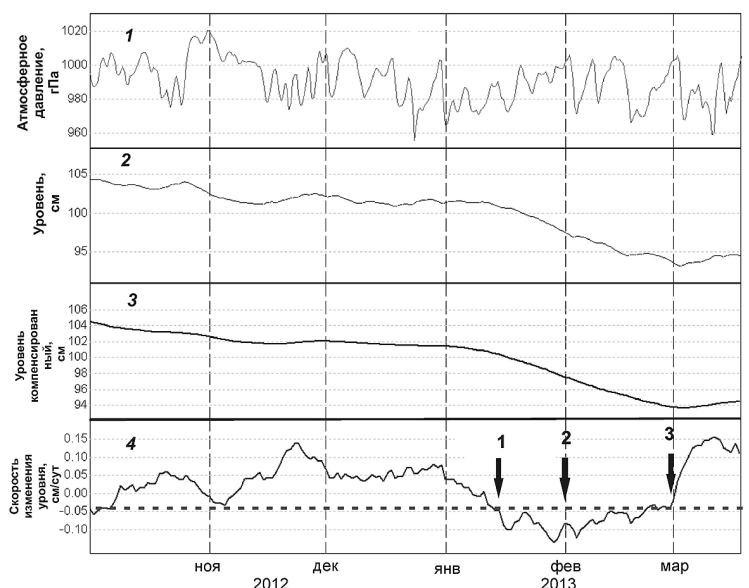


Рис. 5. Изменения уровня воды в скважине Е-1 с 1 октября 2012 по 18 марта 2013 гг. 1 и 2 – данные 5-минутной регистрации атмосферного давления и уровня воды, 3 – среднесуточные изменения уровня воды с компенсированными баровариациями, 4 – суточная скорость изменения уровня воды с учетом скорости нисходящего тренда. На графике тремя стрелками показаны: 1 – 16 января 2013 г., начало проявления гидрогеодинамического предвестника; 2 – 1 февраля 2013 г., дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС; 3 – 28 февраля 2013 г., дата землетрясения. Горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение суточной скорости изменений уровня воды

дений [Копылова, Сизова, 2012]: «вероятность события с $M \geq 5,0$ $P = 0,45$, прогнозная эффективность предвестника $I = 1,4$; вероятность события с $M \geq 5,9$ $P = 0,73$, прогнозная эффективность предвестника $I = 2,2$ ».

Произошедшее 28 февраля землетрясение с $M = 6,8$ на расстоянии 290 км от скважины соответствовало прогнозу от 1 февраля по величине магнитуды, времени и местоположению. Поэтому прогноз, поданный 1 февраля в КФ РЭС, является успешным. Поданный прогноз также является вероятностным, так как сопровождался оценками вероятности его реализации в отношении событий с различными величинами магнитуды. Это стало возможным благодаря тому, что была выполнена систематизация данных о проявлении гидрогеодинамического предвестника для периода многолетних (1987 г. – настоящее время) наблюдений на скв. Е-1 и тем самым было обеспечено его параметрическое описание [Копылова, 2001, 2008; Копылова, Сизова, 2012].

По данным регистрации физико-химических параметров подземных вод в скв. Е-1 с использованием глубинного зонда было обнаружено слабое повышение электропроводности воды с амплитудой 1–2 мСм/м в течение двух суток после землетрясения. В изменениях температуры воды гидрогеосейсмические вариации не проявлялись.

Заключение

1. Созданная в КФ ГС РАН система наблюдений на скважинах позволяет диагностировать гидрогеосейсмические вариации в изменениях химического состава воды, уровня и физико-химических параметров подземных вод в режиме близком к реальному времени. Наличие таких данных позволяет ставить вопрос об экспериментальном изучении триггерного воздействия сейсмичности на подземные воды на Камчатке. Методология изучения триггерного воздействия сейсмичности на подземные воды должна включать систематизацию и типизацию гидрогеосейсмических вариаций параметров подземных вод в сопоставлении с данными о вызвавших их землетрясениях и с учетом локальных гидрогеологических условий.

2. По данным урвнемерных наблюдений в скв. Е-1 осуществлен успешный прогноз землетрясения 28 февраля 2013 г., $M = 6,8$ со временем упреждения 4 недели. Прогноз сопровождался вероятностной оценкой его реализации, основанной на ретроспективном изучении связи гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды с произошедшими землетрясениями по данным многолетних наблюдений и его параметрическом описании.

Литература

Болдина С.В., Копылова Г.Н. Моделирование вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванных землетрясением 28.02.2013 г., $M = 6,8$ // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 430–434.

Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И. и др. Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2 (32). С. 92–99.

Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.

Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 6. С. 52–64.

Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006б. № 1. Вып. № 7. С. 50–66.

Копылова Г.Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е-1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24–28.

Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–37.

Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М. Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 75–83.

Копылова Г.Н., Сизова Е.Г. О предвестнике землетрясений, проявляющемся в изменениях уровня воды в скважине Е-1, Камчатка // Вулканизм и связанные с ним процессы: Матер. конф., посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 116–125.

Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96–112.

УДК 551.24 + 550.34

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ В ЗОНЕ ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА

***В.В. Ружич¹, Е.Н. Черных¹, В.Б. Савельева¹,
Д.В. Павлов², А.А. Остапчук²***

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск

² Институт динамики геосфер РАН, Москва

Рассмотрены возможности и результаты применения геологических методов и физических экспериментов на природных геоструктурных объектах для изучения явлений, связанных с процессами контактного трения в зонах разломов. На основании недавних исследований, проведенных в процессе натурных физических экспериментов со взрывными и силовыми воздействиями на выбранный сегмент зоны Приморского разлома, обсуждаются причины и механизмы изменения режимов излучения волновых колебаний сейсмического диапазона. Также рассмотрены подходы к детальному изучению зеркал скольжения в виде образцов горных пород, отобранных из глубинных эксгумированных сегментов зон разломов со следами интенсивной тектонической переработки, включая тончайшее истира-